

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

①1 N° de publication :

2 832 542

(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②1 N° d'enregistrement national :

01 14840

⑤1 Int Cl⁷ : G 11 C 11/15

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 16.11.01.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 23.05.03 Bulletin 03/21.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

⑥0 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

⑦1 Demandeur(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATO-
MIQUE Etablissement de caractère scientifique techni-
que et industriel — FR.

⑦2 Inventeur(s) : DIENY BERNARD et REDON OLI-
VIER.

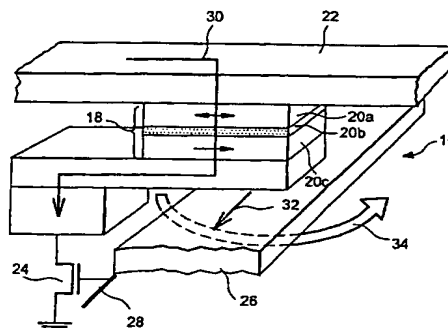
⑦3 Titulaire(s) :

⑦4 Mandataire(s) : BREVATOME.

⑤4 DISPOSITIF MAGNETIQUE A JONCTION TUNNEL MAGNETIQUE, MEMOIRE ET PROCEDES D'ECRITURE ET
DE LECTURE UTILISANT CE DISPOSITIF.

⑤7 Dispositif magnétique à jonction tunnel magnétique,
mémoire et procédés d'écriture et de lecture utilisant ce dis-
positif.

Ce dispositif (16) comprend une couche de référence
(20c) et une couche de stockage (20a) séparées par une
couche semiconductrice ou isolante (20b). La température
de blocage de l'aimantation de la couche de stockage est in-
férieure à celle de la couche de référence. Le dispositif com-
prend aussi des moyens (22, 24) pour chauffer la couche de
stockage au delà de la température de blocage de son
aimantation et des moyens (26) pour lui appliquer un champ
magnétique (34) orientant son aimantation par rapport à cel-
le de la couche de référence sans modifier l'orientation de
cette dernière.



FR 2 832 542 - A1



BEST AVAILABLE COPY

**DISPOSITIF MAGNETIQUE A JONCTION TUNNEL MAGNETIQUE,
MEMOIRE ET PROCEDES D'ECRITURE ET DE LECTURE UTILISANT
CE DISPOSITIF**

5

DESCRIPTION

DOMAINE TECHNIQUE

La présente invention concerne un dispositif magnétique à jonction tunnel ainsi qu'une mémoire
10 utilisant ce dispositif.

L'invention concerne aussi un procédé d'écriture thermomagnétique dans ce dispositif ainsi qu'un procédé de lecture du dispositif.

L'invention trouve une application en
15 électronique et notamment dans la réalisation de points mémoires et de mémoires de type MRAM ("Magnetic Random Access Memory" ou mémoire magnétique à accès direct (ou aléatoire)).

20 **ETAT DE LA TECHNIQUE ANTÉRIEURE**

Les mémoires magnétiques MRAM ont connu un regain d'intérêt avec la mise au point de jonctions tunnel magnétiques (en abrégé MTJ pour "Magnetic Tunnel Junction") présentant une forte magnéto-résistance à
25 température ambiante.

Au sujet des mémoires magnétiques utilisant des jonctions tunnel magnétiques, on consultera par exemple les documents suivants :

- [1] US 5 640 343 A (Gallagher et al.)
30 [2] S.S.P. Parkin et al., J.Appl.Phys., vol.85 n°8, 1999, pp.5828-5833.

Les figures 1A et 1B annexées illustrent schématiquement la structure et la fonction d'une jonction tunnel magnétique connue.

La jonction porte la référence 2. Il s'agit
5 d'un empilement comprenant une couche d'oxyde 3b en sandwich entre deux couches magnétiques. Ce système fonctionne comme une vanne de spin, à la différence que le courant circule perpendiculairement aux plans des couches.

10 L'une 3a des couches magnétiques est dite "libre" ou "de stockage" car on peut orienter son aimantation dans la direction désirée à l'aide d'un champ magnétique extérieur (flèche bidirectionnelle) ; l'autre couche magnétique 3c est dite "piégée" ou "de
15 référence" car sa direction d'aimantation est fixée par couplage d'échange avec une couche antiferromagnétique (flèche unidirectionnelle).

Lorsque les aimantations des couches magnétiques sont antiparallèles, la résistance de la
20 jonction est élevée ; lorsque les aimantations sont parallèles, cette résistance devient faible. La variation relative de résistance entre ces deux états peut atteindre 40% par un choix approprié des matériaux des couches de l'empilement et/ou de traitements
25 thermiques de ces matériaux.

La jonction 2 est placée entre un transistor de commutation 4 et une ligne d'amenée de courant 6 formant une ligne conductrice supérieure. Un courant I1 passant dans celle-ci produit un premier champ
30 magnétique 7. Un conducteur 8 formant une ligne conductrice inférieure, orthogonale à la ligne d'amenée

de courant 6 permet, en y faisant circuler un courant I2, de produire un second champ magnétique 9.

Dans le mode "écriture" (figure 1A), le transistor 4 est placé en mode bloqué et aucun courant ne traverse donc ce transistor. On fait circuler des impulsions de courant dans la ligne d'amenée de courant 6 et dans le conducteur 8. La jonction 2 est donc soumise à deux champs magnétiques orthogonaux. L'un est appliqué selon l'axe de difficile aimantation de la couche libre 3a, afin de réduire son champ de retournement, tandis que l'autre est appliqué selon son axe facile afin de provoquer le retournement de l'aimantation et donc l'écriture du point mémoire.

Dans le principe, seul le point mémoire placé à l'intersection des deux lignes 6 et 8 est susceptible de se retourner, car chaque champ magnétique pris individuellement n'est pas suffisamment grand pour provoquer un basculement de l'aimantation.

Dans le mode "lecture" (figure 1B), le transistor est placé en régime saturé (c'est-à-dire que le courant traversant ce transistor est maximum) par l'envoi d'une impulsion de courant positive dans la grille du transistor. Le courant I3 envoyé dans la ligne 6 traverse uniquement le point mémoire dont le transistor est placé en mode saturé.

Ce courant permet de mesurer la résistance de la jonction de ce point mémoire. Par comparaison avec un point mémoire de référence, l'état du point mémoire ("0" ou "1") peut ainsi être déterminé : on sait alors si l'aimantation de la couche de stockage 3a est parallèle au antiparallèle à celle de la couche de

référence 3c.

Un tel mécanisme d'écriture présente des inconvénients en particulier dans un réseau de jonctions tunnel :

5 1) Comme le renversement de l'aimantation de la couche libre d'une jonction se produit sous l'effet de champs extérieurs et comme les champs de retournement sont statistiquement distribués, il n'est pas impossible de retourner accidentellement certaines
10 jonctions voisines simplement par l'effet du champ magnétique produit le long d'une ligne conductrice inférieure ou supérieure. Comme, pour des mémoires à haute densité, la taille des points mémoires est nettement submicronique, le nombre d'erreurs
15 d'adressage augmente.

2) La diminution de la taille des points mémoires entraîne une augmentation de la valeur du champ de retournement individuel ; un courant plus important est alors nécessaire pour écrire les points
20 mémoires; ce qui tend à augmenter la consommation électrique.

3) Le mode d'écriture utilise deux lignes de courant à 90°, ce qui limite la densité d'intégration.

25 **EXPOSE DE L'INVENTION**

La présente invention a pour but de remédier aux inconvénients précédents.

Selon un aspect de la présente invention, on propose un dispositif magnétique à jonction tunnel
30 magnétique qui est utilisable dans une MRAM et dans lequel le mécanisme d'écriture est insensible à la

distribution des champs de retournement pour éliminer les erreurs d'adressage et obtenir une bonne reproductibilité de l'écriture des informations.

Selon un autre aspect de l'invention, on propose un dispositif magnétique à jonction tunnel magnétique dont la consommation en énergie est faible.

Selon encore un autre aspect, on propose un dispositif magnétique à jonction tunnel magnétique permettant un stockage multi-niveaux d'informations. Cela présente l'avantage, dans une mémoire conforme à l'invention, d'accroître la capacité de stockage pour un même nombre de points mémoires.

La présente invention a également pour but d'améliorer les mémoires magnétiques en diminuant la taille de leurs points mémoires, tout en gardant l'information stable à température ambiante, ainsi que le taux d'erreur d'écriture de ces mémoires.

Dans l'invention, on utilise une propriété connue d'un matériau magnétique, selon laquelle le champ de retournement de l'aimantation est très faible lorsqu'on élève la température de ce matériau au-delà de la température de blocage de l'aimantation de ce matériau.

De façon précise, la présente invention a pour objet un dispositif magnétique comprenant une jonction tunnel magnétique qui comporte :

- une première couche magnétique formant une couche de référence et ayant une aimantation de direction fixe,
- une deuxième couche magnétique formant une couche de stockage et ayant une aimantation de

direction variable, et

- une troisième couche qui est semiconductrice ou électriquement isolante et qui sépare la première couche de la deuxième couche,

5 ce dispositif étant caractérisé en ce que la température de blocage de l'aimantation de la couche de stockage est inférieure à la température de blocage de l'aimantation de la couche de référence et en ce que le dispositif comprend en outre :

10 - des moyens d'échauffement de la couche de stockage à une température supérieure à la température de blocage de l'aimantation de cette couche de stockage et

- des moyens d'application, à cette couche de
15 stockage, d'un champ magnétique apte à orienter l'aimantation de cette couche de stockage par rapport à l'aimantation de la couche référence, sans modifier l'orientation de cette couche de référence.

Selon un mode de réalisation préféré de
20 l'invention, les températures de blocage des couches de stockage et de référence ont des valeurs supérieures à la valeur de la température de fonctionnement du dispositif hors échauffement de la jonction tunnel (on sait que le dispositif s'échauffe lorsqu'il
25 fonctionne).

Selon un premier mode de réalisation
particulier du dispositif objet de l'invention,
l'aimantation de chacune des couches de stockage et de
référence est sensiblement perpendiculaire au plan de
30 ces couches.

Dans ce cas, la couche de stockage peut être

une monocouche en alliage Co-Pt ou Co-Pd ou une multicouche formée par un empilement de couches de Co alternant avec des couches de Pt ou de Pd de façon que le champ coercitif de la couche de stockage diminue
5 rapidement quand la température augmente.

En variante, la couche de stockage peut être une monocouche en alliage riche en cobalt avec du fer ou du nickel ou du chrome ainsi que du platine ou du palladium, ou une multicouche formée par un empilement
10 de couches d'un alliage riche en cobalt avec du fer ou du nickel ou du chrome, alternant avec des couches de Pt ou de Pd de façon que le champ coercitif de la couche de stockage diminue rapidement quand la température augmente.

15 Selon un deuxième mode de réalisation particulier, l'aimantation de chacune des couches de stockage et de référence est sensiblement parallèle au plan de ces couches.

Le dispositif objet de l'invention peut
20 comprendre en outre une première couche antiferromagnétique associée à la couche de référence.

De préférence, la température de blocage de l'aimantation de cette première couche antiferromagnétique est supérieure à la température de
25 blocage de la couche de stockage.

Selon un mode de réalisation particulier de l'invention, la couche de référence est une multicouche comprenant deux couches magnétiques et une couche intermédiaire en Ru ou en Re ou en Ir ou en Rh, les
30 deux couches magnétiques étant séparées par la couche intermédiaire et couplées de façon antiparallèle par

interaction à travers cette couche intermédiaire.

Selon un mode de réalisation préféré du dispositif objet de l'invention, ce dispositif comprend en outre une deuxième couche antiferromagnétique
5 couplée à la couche de stockage par anisotropie d'échange.

De préférence, la température de blocage de l'aimantation de cette deuxième couche antiferromagnétique est inférieure à la température de
10 blocage de la couche de référence.

Selon un mode de réalisation particulier de l'invention, les moyens d'échauffement de la couche de stockage comprennent des moyens prévus pour faire circuler un courant d'électrons à travers la jonction
15 tunnel magnétique.

Les moyens d'application du champ magnétique à la couche de stockage peuvent comprendre des moyens d'injection, dans cette couche de stockage d'un courant d'électrons dont le spin est polarisé.

20 La présente invention concerne aussi une mémoire comprenant une matrice de points mémoires adressables par des lignes et des colonnes d'adressage, cette mémoire étant caractérisée en ce que chaque point mémoire comprend :

25 -un dispositif magnétique conforme à l'invention, et

- un moyen de commutation de courant placé en série avec ce dispositif magnétique,

chaque dispositif magnétique étant relié à une
30 ligne d'adressage et chaque moyen de commutation étant relié à une colonne d'adressage.

La présente invention concerne également un procédé d'écriture d'une information dans un dispositif magnétique conforme à l'invention, dans lequel :

- on chauffe la couche de stockage à une
5 température supérieure à la température de blocage de l'aimantation de cette couche de stockage et

- pendant le refroidissement de la couche de stockage, on applique à cette couche de stockage un champ magnétique apte à orienter l'aimantation de cette
10 couche de stockage par rapport à l'aimantation de la couche de référence, sans modifier l'orientation de cette couche de référence.

De préférence la valeur, vue par la couche de référence, du champ magnétique appliqué au cours du
15 stockage, est inférieure à la valeur que prend le champ magnétique de retournement de l'aimantation de la couche de référence à la température maximale atteinte par cette couche au cours de l'échauffement de la jonction.

20 Selon un mode de mise en œuvre préféré du procédé d'écriture objet de l'invention, la couche de stockage est couplée à une couche antiferromagnétique par anisotropie d'échange et l'on chauffe la couche de stockage et cette couche antiferromagnétique à une
25 température supérieure à la température de blocage de l'aimantation de ces couches et, au cours du refroidissement de la couche antiferromagnétique, on oriente l'aimantation de la couche de stockage dans une direction quelconque prédéfinie par la direction
30 d'aimantation du champ magnétique appliqué pendant le refroidissement.

La présente invention concerne en outre un procédé de lecture d'une information mémorisée dans un dispositif conforme à l'invention, dans lequel

- on détermine la valeur de la résistance de la jonction tunnel magnétique, et
- on déduit l'orientation de l'aimantation de la couche de stockage à partir de cette valeur de la résistance.

BREVE DESCRIPTION DES DESSINS

La présente invention sera mieux comprise à la lecture de la description d'exemples de réalisation donnés ci-après, à titre purement indicatif et nullement limitatif, en faisant référence aux dessins annexés sur lesquels :

- les figures 1A et 1B illustrent schématiquement le principe de fonctionnement d'un dispositif magnétique connu, à jonction tunnel, et ont déjà été décrites,

- la figure 2 est une vue schématique et partielle d'une mémoire comprenant une matrice de dispositifs magnétiques à jonction tunnel

- la figure 3 illustre schématiquement le principe de fonctionnement d'un dispositif magnétique à jonction tunnel conforme à l'invention,

- la figure 4 est une vue en coupe schématique d'un exemple de jonction tunnel qui est utilisable dans la présente invention et dont des couches ont une aimantation perpendiculaire au plan de ces couches,

- la figure 5 est un graphique illustrant l'obtention de deux champs coercitifs différents en couplant à un matériau antiferromagnétique l'une des

deux couches d'une jonction tunnel utilisable dans l'invention,

- la figure 6 est un graphique montrant les variations du champ de retournement en fonction de la température pour des multicouches utilisables dans l'invention,

- la figure 7 illustre schématiquement un exemple d'un ensemble de dispositifs magnétiques conformes à l'invention, utilisant des jonctions tunnel à aimantation perpendiculaire au plan de leurs couches,

- la figure 8 illustre schématiquement un exemple de dispositif magnétique conforme à l'invention, utilisant la combinaison d'un échauffement par effet Joule et d'une commutation magnétique par injection d'un courant d'électrons dont le spin est polarisé,

- la figure 9 est une vue en coupe schématique d'un exemple de jonction tunnel qui est utilisable dans l'invention et a une aimantation planaire.

- la figure 10 est une vue schématique d'un exemple de dispositif magnétique conforme à l'invention, utilisant une jonction tunnel à aimantation planaire, et

- la figure 11 est une vue schématique d'un autre exemple d'un tel dispositif.

EXPOSE DETAILLE DE MODES DE REALISATION PARTICULIERS

Dans un exemple de la présente invention, une mémoire magnétique comprend une matrice de dispositifs magnétiques conformes à l'invention. Chacun de ces dispositifs, également appelés "points mémoires",

comprend une jonction tunnel magnétique de la forme F1/O/F2 où F1 et F2 désignent respectivement la couche magnétique de stockage, également appelée "électrode magnétique de stockage", et la couche magnétique de référence, également appelée "électrode magnétique de référence", et O désigne la couche qui est comprise entre F1 et F2 et forme une barrière tunnel.

Chacune des couches F1 et F2 est caractérisée par un champ de retournement de son aimantation, champ qui est fonction de la température du matériau constituant cette couche.

Dans la présente invention, les matériaux des couches F1 et F2 sont choisis de sorte que la décroissance en température du champ de retournement de la couche F1, noté H_{cF1} , soit beaucoup plus rapide que celle du champ de retournement de la couche F2, noté H_{cF2} .

Typiquement, on choisit les matériaux des couches F1 et F2 de sorte que leurs champs de retournement soient, à température ambiante (environ 20°C), de l'ordre de 100 Oe (environ 8000 A/m) pour F1 (on rappelle que 1 Oe vaut $1000/(4\pi)$ A/m) et de l'ordre de 600 Oe (environ 48000 A/m) pour F2 et, à 200°C, de l'ordre de 5 Oe (environ 400 A/m) pour F1 et 400 Oe (environ 32000 A/m) pour F2.

En d'autres termes, on choisit les matériaux des couches F1 et F2 de sorte que la température de blocage de l'aimantation de la couche F1, également appelée "température de blocage magnétique" de la couche F1 ou, plus simplement, "température de blocage" de la couche F1, soit significativement plus faible que

la température de blocage de l'aimantation de la couche F2.

Lors de l'écriture, le principe de la sélection d'un point mémoire consiste alors à provoquer un très
5 bref échauffement (jusqu'à une température T_{max} , typiquement jusqu'à $200^{\circ}C$) de ce point mémoire, échauffement qui a pour effet d'abaisser le champ de retournement de l'aimantation de la couche magnétique F1 dans laquelle l'information est stockée.

10 Le principe de fonctionnement du dispositif étant basé sur des variations de température, il semble évident que les couches de stockage et de référence doivent de préférence avoir des températures de blocage supérieures à la température de fonctionnement du
15 dispositif hors échauffement.

De plus, le but de ce dispositif étant de stocker de l'information de façon stable, il est donc, aussi pour cette raison, préférable que ces couches aient des températures de blocage nettement supérieures
20 à la température de fonctionnement du dispositif.

Pendant le refroidissement du point mémoire, un champ magnétique d'amplitude H_e tel que

$$H_{cF1}(T_{max}) < H_e < H_{cF2}(T_{max}),$$

H_e étant ainsi typiquement compris entre
25 environ 20 Oe et 60 Oe (environ 1600A/m et 4800A/m), est appliqué dans la direction dans laquelle on souhaite orienter l'aimantation de la couche de stockage F1.

L'aimantation de cette couche de stockage F1
30 s'oriente alors dans la direction du champ appliqué H_e alors que celle de la couche de référence F2, également

appelée "couche piégée", reste toujours orientée dans la même direction.

L'échauffement de la jonction peut être contrôlé par l'envoi d'une brève impulsion de courant
5 (de l'ordre de 10^4A/cm^2 à 10^5A/cm^2 pendant quelques nanosecondes) au travers de la jonction.

Le champ magnétique H_e est créé par l'envoi d'impulsions de courant dans des lignes conductrices situées dans des plans se trouvant au dessus et/ou au
10 dessous des jonctions tunnel magnétiques.

Une deuxième possibilité pour faire commuter l'aimantation de la couche de stockage lors de son refroidissement peut consister à injecter dans cette couche un courant d'électrons dont le spin est
15 polarisé, suivant l'une des techniques qui sont mentionnées plus loin.

La présente invention consiste dans ce cas à combiner l'échauffement du matériau de la couche de stockage, pour réduire le champ de retournement de
20 l'aimantation de cette couche, avec l'application d'un couple magnétique à cette aimantation, lors du refroidissement de la couche de stockage, en faisant circuler un courant d'électrons dont le spin est polarisé à travers la couche de stockage.

25 Il est également possible de combiner la commutation, par application d'un champ local engendré par l'envoi d'un courant dans une ligne conductrice supérieure ou inférieure, avec l'injection d'un courant d'électrons à spin polarisé dans la couche de stockage
30 de la jonction.

Quatre avantages majeurs de la présente

invention peuvent être mis en avant:

1) Sélection sans faille des points mémoires:

La présente invention permet une bien meilleure sélection des points mémoires que les techniques
5 connues. En effet, supposons que les points mémoires soient organisés en un réseau carré comme on le voit sur la figure 2 qui représente l'architecture d'une mémoire MRAM connue.

Dans cette mémoire connue, on distingue trois
10 niveaux de lignes :

- les lignes conductrices supérieures 10 qui servent à générer le champ magnétique H_x à appliquer aux jonctions tunnel magnétiques 2 lors de l'écriture et qui servent aussi de contacts électriques pour ces
15 jonctions lors de la lecture,

- les lignes conductrices inférieures 12 qui servent uniquement à générer le champ magnétique H_y au moment de l'écriture, et

- les lignes de contrôle 14 qui agissent sur la grille des transistors 4 pour les mettre en position
20 passante (saturée) ou fermée (bloquée).

Selon un procédé d'écriture connu, l'écriture se fait en envoyant des impulsions de courant le long des lignes conductrices supérieure et inférieure qui se
25 croisent au point mémoire que l'on souhaite adresser. Or, s'il existe une distribution de champ de retournement, certains points mémoires situés le long des lignes risquent de se retourner de façon incontrôlée.

30 Dans la présente invention, ce problème ne se pose pas. Ceci est schématiquement illustré par la

figure 3 où l'on voit un dispositif magnétique 16 conforme à l'invention, formant un point mémoire, ou cellule, d'une mémoire MRAM conforme à l'invention.

Ce point mémoire comprend une jonction tunnel magnétique 18, comportant une couche de stockage 20a, une couche de référence 20c et une couche isolante ou semiconductrice 20b entre ces dernières. Cette jonction est placée entre une ligne conductrice supérieure 22 et un transistor de commutation 24 et associée à une ligne conductrice inférieure 26 qui est perpendiculaire à la ligne 22.

En rendant passant le transistor 24 du point mémoire 16, ce transistor étant commandé par une ligne de contrôle 28, et en envoyant une impulsion de courant 30 dans la ligne conductrice supérieure 22 correspondante, cette impulsion de courant traverse la jonction 18 et provoque son échauffement.

Or les jonctions de la mémoire de la figure 3 sont organisées en réseau carré comme dans la mémoire de la figure 2 (dont les références des éléments sont d'ailleurs suivies, entre parenthèses, des références des éléments correspondants de la figure 2). Donc seule une jonction de tout le réseau sera échauffée par l'impulsion de courant 30, toutes les autres restant à température ambiante.

L'abaissement de champ de retournement lié à l'élévation de température (typiquement de 100 Oe, à 20°C, à 5 Oe, à 200°C) est beaucoup plus important que la largeur de la distribution de champ de retournement à température ambiante (typiquement 100 Oe \pm 20 Oe).

En conséquence, en envoyant une impulsion de

courant 32 dans la ligne conductrice inférieure 26, ce qui génère un champ magnétique 34 de l'ordre de 10 Oe pendant le refroidissement de la jonction adressée, on est sûr de ne faire commuter que l'aimantation de la
5 couche de stockage 20a de cette jonction.

Cependant, la ligne 26 n'est pas indispensable pour créer le champ magnétique. On peut très bien utiliser la ligne supérieure 22 (utilisée dans un premier temps pour provoquer l'échauffement) pour
10 générer dans un deuxième temps le champ magnétique lors du refroidissement.

Dans le cas de la figure 3, si l'on supprime la ligne 26, il faut veiller à ce que les directions d'aimantation des couches soient perpendiculaires à la
15 ligne de courant 22 génératrice du champ magnétique (par exemple en faisant pivoter le dispositif).

Le fonctionnement du point mémoire 16 de la figure 3 est donc le suivant : le transistor d'adressage 24 étant à l'état passant, l'écriture se
20 fait en envoyant une impulsion de courant à travers la jonction 18 pour échauffer la jonction jusque vers 200°C. Pendant le refroidissement de la jonction, une impulsion de courant est envoyée dans la ligne conductrice inférieure 26 pour générer un champ
25 magnétique dans la couche de stockage 20a, qui a pour effet de faire commuter l'aimantation de cette couche dans la direction désirée.

La lecture se fait avec le transistor à l'état bloqué en faisant circuler un courant à travers la
30 jonction (le courant étant plus faible que lors de l'écriture pour que l'échauffement soit moindre), ce

qui permet d'en mesurer la résistance et donc de savoir si l'aimantation de la couche de stockage 20a est parallèle ou antiparallèle à celle de la couche de référence 20c.

5 2) Consommation réduite :

Compte tenu du fait que les champs à générer pour l'écriture sont beaucoup plus faibles que dans l'art antérieur (typiquement 10 Oe dans la présente invention contre 50 Oe dans l'art antérieur),
10 l'intensité des impulsions de champ à envoyer dans les lignes conductrices est grandement réduite.

De plus, une seule impulsion dans la ligne conductrice inférieure est nécessaire dans le cas de la figure 3, contre une impulsion dans la ligne
15 conductrice inférieure et une impulsion dans la ligne conductrice supérieure dans l'art antérieur.

La puissance nécessaire pour provoquer l'échauffement du point mémoire étant beaucoup plus faible que pour générer les impulsions de champ de 50
20 Oe (typiquement 1pJ pour chauffer de 200°C une jonction tunnel magnétique de 150 nm x 150 nm contre plusieurs dizaines de pJ pour générer une impulsion de champ de 50 Oe le long d'une ligne de 500 points mémoires), il s'ensuit que la consommation électrique peut être
25 divisée par 10 avec le principe de fonctionnement de la présente invention.

3) Stabilité de l'information pour de petites dimensions:

La présente invention permet d'utiliser, pour
30 la couche de stockage, des matériaux à forte énergie de piégeage à température ambiante. Dans l'art antérieur,

cela n'est pas possible car plus le piégeage de la couche de stockage est important, plus il faut fournir d'énergie pour faire commuter l'aimantation de la couche de stockage.

5 Dans la présente invention, on abaisse l'énergie de piégeage lors de l'écriture en chauffant le matériau. On peut donc se permettre d'avoir une énergie de piégeage forte à température ambiante. Cela présente un avantage considérable pour de petites
10 dimensions. En effet, dans l'art antérieur, l'information stockée dans la couche de stockage devient instable par rapport aux fluctuations thermiques à température ambiante.

En effet, si K et V désignent respectivement
15 l'anisotropie magnétique par unité de volume (ou, plus généralement, l'énergie de piégeage par unité de volume) et le volume de la couche de stockage, l'information devient instable si $KV < 25kT$ (où k est la constante de Boltzmann et T la température).

20 Pour un matériau donné, cette limite est toujours atteinte à un moment ou à un autre lorsqu'on diminue la taille du point mémoire alors que, dans la présente invention, on peut très bien compenser la diminution du volume par une augmentation de l'énergie
25 de piégeage à température ambiante et donc réduire la taille du point mémoire autant que le permet le procédé de fabrication (par exemple lithographie/gravure) utilisé.

4) Simplicité de la réalisation si l'on
30 utilise comme principe de commutation un chauffage plus une injection d'un courant d'électrons à spin

polarisé :

En effet, il n'y a pas besoin, dans ce cas, de rajouter un niveau de lignes pour la génération des champs magnétiques locaux. La réalisation de l'ensemble
5 des points mémoires s'en trouve simplifiée, ce qui peut permettre d'atteindre des densités d'intégration supérieures.

On reviendra plus loin sur l'utilisation, dans la présente invention, d'un courant d'électrons à spin
10 polarisé.

On considère, dans ce qui suit, divers exemples de l'invention.

Comme on l'a vu plus haut, la structure de base, dans la présente invention, comporte deux couches
15 magnétiques F1 et F2 séparées par une barrière tunnel O de sorte que l'on peut noter cette structure F1/O/F2. Les deux couches magnétiques sont telles que le champ de retournement de l'aimantation de l'une de ces deux couches magnétiques (la couche de stockage) décroît
20 beaucoup plus vite, lorsque la température augmente, que celui de l'autre couche magnétique (la couche de référence).

Dans un premier mode de réalisation de l'invention, les aimantations des deux couches F1 et F2
25 sont perpendiculaires au plan des couches ou, plus précisément, aux interfaces de ces couches.

Des couches F1 et F2 peuvent être constituées d'un matériau pur, d'un alliage ou d'un ensemble de couches alternées dont certaines sont magnétiques.

30 Des couches de Co, de structure hexagonale, ont leur aimantation perpendiculaire au plan de ces couches

si l'axe c de la maille hexagonale est perpendiculaire au plan de l'échantillon contenant ces couches. Des couches en alliages tels que CoPt, FePd et FePt peuvent aussi avoir des aimantations perpendiculaires à leur plan. Enfin, des multicouches comprenant une alternance de couches de deux matériaux différents dont au moins l'un est magnétique, comme par exemple Co 0,6nm/Pt 1,4nm, peuvent aussi avoir des aimantations perpendiculaires au plan.

Le cobalt peut être aisément remplacé par un alliage riche en Co (supérieur à 70%) avec par exemple du Fe ou du Ni ou du Cr.

Un exemple de réalisation d'une jonction tunnel magnétique à base de multicouches Co/Pt, qui est utilisable dans la présente invention, est montré sur la figure 4.

Plus précisément, comme on le voit sur la figure 4, cette jonction tunnel magnétique comprend une couche de référence 36 et une couche de stockage 38 qui ont une aimantation perpendiculaire au plan de ces couches; la couche de référence 36 comprend des couches 40 en cobalt qui alternent avec des couches 42 en platine; de même, la couche de stockage 38 comprend des couches 44 en cobalt qui alternent avec des couches 46 en platine; les couches 36 et 38 sont séparées par une couche de barrière tunnel 48 en alumine.

En jouant sur les épaisseurs relatives de Co et de Pt, on peut faire varier la coercitivité du matériau constitutif de chacune des couches 36 et 38 ainsi que la variation de cette coercitivité en fonction de la température. On peut aussi augmenter l'énergie de

piégeage de l'aimantation de l'une des couches (la couche de référence 36) en la couplant à un matériau antiferromagnétique 50 à forte température de blocage, comme PtMn ou PtPdMn.

5 Dans ce cas, la couche ferromagnétique adjacente voit la valeur de sa température de blocage augmenter jusqu'à la valeur de celle de la couche antiferromagnétique.

10 D'autres exemples de multicouches à anisotropie perpendiculaire, utilisables dans l'invention, sont par exemple Co/Pd, Co/Ni, Cu/Ni.

15 A titre d'exemple, la figure 5 montre qu'on peut obtenir une structure à aimantation perpendiculaire au plan, qui associe deux multicouches de coercivités différentes.

 On a tracé les variations de la magnétorésistance MR (en%) en fonction du champ magnétique appliqué H (en kOe) pour la structure

$$\text{NiO}_{300}/\text{Co}_6/(\text{Pt}_{18}/\text{Co}_6)_2/\text{Cu}_{30}/(\text{Co}_6/\text{Pt}_{18})_2.$$

20 Dans le cas de la figure 5, l'augmentation de coercitivité de l'une des multicouches est obtenue en couplant l'aimantation de cette multicouche à une couche antiferromagnétique adjacente (par exemple NiO (cas de la figure 5), PtMn, PdPtMn ou FeMn).

25 Le même résultat pourrait être obtenu en associant une multicouche de Co/Pt à un alliage de FePt.

30 Par ailleurs, chacun des matériaux précités a sa propre variation de champ coercitif en fonction de la température.

 La figure 6 montre par exemple les variations

du champ de retournement H_r (en Oe) d'une multicouche (Co 0,6nm/Pt 1,4nm) en fonction de la température T (en °C) pour une plaque "pleine tranche", de dimension latérale macroscopique (courbe I), et dans des réseaux
5 (en anglais "arrays") de plots de dimensions submicroniques (courbe II).

Pour les épaisseurs de Co et de Pt utilisées, le champ de retournement H_r décroît rapidement avec la température pour quasiment s'annuler à une température
10 T_c de l'ordre de 200°C.

Si l'on augmente l'épaisseur de Co à épaisseur de Pt fixe, le champ de retournement décroît moins vite, c'est à dire s'annule à une température supérieure à 200°C. De même, dans l'alliage FePt, le
15 champ de retournement s'annule vers 500°C.

Donc en réalisant par exemple une jonction tunnel magnétique qui associe une multicouche, formée d'une alternance de couches de Co et de couches de Pt, avec une électrode en alliage FePt, on réalise une
20 structure conforme à l'invention. En envoyant une impulsion de courant à travers la jonction, on élève la température de cette dernière jusqu'à vers 200°C.

On coupe alors le courant qui circulait à travers la jonction et, pendant le refroidissement de
25 cette jonction, on applique un faible champ magnétique à l'aide de lignes conductrices inférieures ou supérieures (voir la figure 7). L'aimantation de la couche de référence demeure inchangée alors que celle de la couche de stockage s'oriente dans la direction du
30 champ appliqué pendant le refroidissement.

Plus précisément, la figure 7 illustre un

exemple de réalisation d'un ensemble de plusieurs points mémoires à partir de jonctions tunnel à aimantation perpendiculaire au plan selon la présente invention. Ces jonctions 52a, 52b, 52c et 52d
5 comprennent chacune une couche de référence 54, une couche de stockage 56 et, entre celles-ci, une couche isolante ou semiconductrice 58. Ces jonctions 52a, 52b, 52c et 52d sont comprises entre des transistors de commutation 60a, 60b, 60c et 60d et une ligne
10 conductrice 62.

On voit aussi des lignes conductrices supérieures, telle que les lignes 64, 66 et 68, qui sont situées de part et d'autre des jonctions.

Pour l'écriture d'un point mémoire, par exemple
15 celui qui comprend la jonction 52b, cette jonction est chauffée au dessus de la température de blocage de la couche de stockage mais en dessous de la température de blocage de la couche de référence par l'envoi d'une impulsion à travers la jonction.

20 De plus, les transistors sont mis à l'état bloqué sauf le transistor 60b associé à la jonction 52b, qui est mis à l'état passant.

Les deux lignes conductrices supérieures 64 et 66 situées de part et d'autre de la jonction à adresser
25 52b sont alimentées par des courants sensiblement opposés pour créer deux champs magnétiques 70 et 72 sensiblement perpendiculaires au plan, qui s'ajoutent au niveau de la jonction à adresser. Ces champs servent à polariser l'aimantation de la couche de stockage
30 pendant son refroidissement en dessous de sa température de blocage. L'aimantation de la couche de

stockage peut prendre ici deux états (stockage binaire).

Une deuxième méthode pour réaliser la commutation lors du refroidissement consiste à injecter
5 un courant d'électrons à spin polarisé à travers la couche de stockage. Une structure permettant de réaliser cette opération est représentée sur la figure 8.

Sur cette figure 8, on voit un empilement 74
10 compris entre une ligne conductrice supérieure 76 et un transistor de commutation 78. L'empilement comprend, en allant de la ligne 76 au transistor 78, une couche 80 en PtMn, une couche de référence 82, une couche d'alumine 84, une couche de stockage 86, une couche de
15 cuivre 88, une couche 90 dite "polarisante" et une couche 92 en PtMn.

La couche de stockage 86 est constituée ici d'un matériau à aimantation perpendiculaire dont le champ de retournement s'annule vers 200°C tel que par
20 exemple une multicouche (Co/Pt). La couche de référence 82 est constituée d'un matériau dont le champ de retournement et l'aimantation restent importants à 200°C, comme par exemple FePt. De même, l'aimantation de la deuxième couche magnétique de FePt formant la
25 couche polarisante 90 reste importante à 200°C.

Le principe de la commutation magnétique est le suivant: on applique une impulsion de courant soit de haut en bas soit de bas en haut à travers la jonction tunnel.

30 Cette impulsion de courant a un profil particulier: elle monte à sa valeur maximum en un temps

de l'ordre de 1ns à quelques nanosecondes puis redescend progressivement à zéro en quelques nanosecondes. Cette impulsion de courant a pour effet, dans un premier temps, d'échauffer la jonction puis,
5 dans un deuxième temps, lors de la décroissance du courant c'est à dire lors du refroidissement de la jonction, d'orienter l'aimantation dans une direction particulière.

Si le courant circule de haut en bas (c'est à
10 dire si les électrons circulent de bas en haut), des électrons à spin polarisé « vers le bas » sont injectés dans la multicouche de Co/Pt. De plus, les électrons qui vont traverser par effet tunnel la barrière d'alumine 84 sont préférentiellement des électrons dont
15 le spin est parallèle à l'aimantation de la couche 82 de FePt et sont donc des électrons à spin « vers le haut ».

Cela va générer, dans la multicouche de Co/Pt, un excès d'électrons vers le bas. Cet excès d'électrons
20 vers le bas, cumulé avec l'injection d'électrons vers le bas en provenance de la couche polarisante inférieure, va forcer l'aimantation de la multicouche de Co/Pt à s'orienter vers le bas lors de son refroidissement.

25 Au contraire, si le courant circule de bas en haut (c'est à dire si les électrons circulent de haut en bas), il va y avoir accumulation d'électrons « vers le haut » dans la couche de Co/Pt, ce qui aura pour effet de forcer l'aimantation de cette couche à
30 s'orienter vers le haut lors de son refroidissement.

Précisons que ce principe de commutation

magnétique pourrait fonctionner également sans la couche polarisante inférieure mais la forme de l'impulsion de courant serait alors plus difficile à ajuster pour trouver un bon équilibre entre une
5 réduction du courant suffisante pour que la température de la jonction baisse suffisamment et une circulation de courant suffisante pour arriver à polariser l'aimantation de la couche de stockage lors de son refroidissement.

10 L'intérêt de la couche polarisante supplémentaire 90 est de permettre de cumuler le courant d'électrons à spin polarisé provenant de l'autre couche 82 de la jonction tunnel et le courant d'électrons à spin polarisé provenant de la couche
15 polarisante 90.

Cette structure du point mémoire est particulièrement simple puisqu'elle ne nécessite, en plus du transistor d'adressage et de la jonction tunnel, qu'un niveau de ligne conductrice.

20 Dans un deuxième mode de réalisation de l'invention, les aimantations des deux couches F1 et F2 sont parallèles au plan des couches ou, plus précisément, aux interfaces de ces couches.

Comme précédemment, les matériaux magnétiques
25 constitutifs de la jonction tunnel magnétique doivent être choisis de sorte que l'un présente une décroissance thermique de son champ coercitif plus rapide que l'autre.

Le matériau de la couche F2 de référence peut
30 être en alliage à base de Co, Fe, Ni (par exemple $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$) et son aimantation peut être piégée par

interaction d'échange avec un matériau antiferromagnétique à forte température de blocage (très supérieure à 200°C) comme PtMn.

Le matériau de la couche F1 peut être constitué
5 d'un alliage dont la température de Curie est réduite en volume pour permettre de faciliter le basculement de son aimantation lorsque ce matériau est chauffé vers 200°C.

Un mode avantageux de réalisation de cette
10 propriété consiste à coupler l'aimantation de la couche de stockage à une couche antiferromagnétique à faible température de blocage (par exemple $\text{Fe}_{50}\text{Mn}_{50}$ ou $\text{Ir}_{20}\text{Mn}_{80}$ dont la température de blocage est inférieure à 200°C tandis que l'aimantation de l'autre couche magnétique
15 (la couche de référence) est couplée à un matériau antiferromagnétique à forte température de blocage, par exemple PtMn dont la température de blocage est supérieure à 280°C.

Ceci est schématiquement illustré par la figure
20 9 où l'on voit un exemple de jonction tunnel à aimantation planaire utilisable dans la présente invention.

La couche de référence 94 en $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ est piégée par interaction avec une couche antiferromagnétique 96
25 à haute température de blocage (très supérieure à 200°C), par exemple en PtMn ou en NiMn.

La couche de stockage 98 en $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ est couplée à une couche antiferromagnétique 100 à faible température de blocage (compris entre 100°C et 200°C),
30 par exemple en $\text{Fe}_{50}\text{Mn}_{50}$ ou en $\text{Ir}_{20}\text{Mn}_{80}$ et cette couche 98 est séparée de la couche 94 par une couche de barrière

tunnel 102 en Al_2O_3 .

Notons qu'une façon de faire baisser la température de blocage de la couche antiferromagnétique couplée à la couche de stockage peut être de diminuer son épaisseur. On sait en effet que plus une couche
5 antiferromagnétique est mince, plus sa température de blocage est basse.

L'écriture de l'information se fait comme précédemment en envoyant une impulsion de courant à travers la jonction, impulsion qui a pour effet
10 d'échauffer le matériau de la couche de stockage (comprenant la couche antiferromagnétique adjacente) à une température permettant le retournement de l'aimantation de cette couche, alors que la couche de
15 référence reste à une température suffisamment faible pour que son aimantation reste fixe.

Ceci est schématiquement illustré par la figure 10 où l'on voit un exemple de réalisation d'un point mémoire à partir d'une jonction tunnel à aimantation
20 planaire conformément à la présente invention.

Pour l'écriture, la jonction est chauffée au dessus de la température de blocage de la couche de stockage 98 mais en dessous de la température de blocage de la couche de référence 94, par l'envoi d'une
25 impulsion de courant à travers la jonction, cette impulsion se propageant de la ligne conductrice 104 au transistor 106, qui est alors rendu passant.

La ligne conductrice supérieure 108 sert à créer le champ magnétique 110 qui polarise
30 l'aimantation de la couche de stockage 98 dans la direction désirée pendant son refroidissement. Cette

aimantation de la couche de stockage ne peut prendre ici que deux états (stockage binaire).

Pour des raisons déjà données plus haut à propos d'autres exemples, la ligne 108 n'est pas obligatoire : sa fonction peut être avantageusement réalisée par la ligne 104. Dans ce cas, il faut aussi veiller à ce que les directions d'aimantation des couches soient orthogonales à la direction de la ligne 104.

10 Ce dispositif, dans lequel la couche de stockage est couplée à une couche antiferromagnétique dont la température de blocage est plus faible que la couche de référence, présente deux avantages majeurs:

1) La limite superparamagnétique de stabilité de la couche de stockage est repoussée de sorte que l'on peut réaliser des points mémoires de taille plus petite en utilisant cette technique.

En effet, un problème qui apparaît toujours dans le stockage de l'information magnétique dans des points mémoires de petites dimensions (échelle submicronique) est celui de la stabilité de l'aimantation vis à vis des fluctuations thermiques (limite superparamagnétique).

Si K désigne l'anisotropie magnétique du matériau et V le volume de la couche magnétique de stockage, le temps caractéristique de renversement de l'aimantation par passage au dessus de la barrière d'énergie de hauteur KV est $\tau = \tau_0 \exp(KV/(kT))$ où τ_0 est un temps caractéristique d'essai de l'ordre de 10^{-9} seconde, k la constante de Boltzman et T la température.

Pour que l'information que l'on écrit dans la couche de stockage reste stable pendant au moins 10 ans, il faut que l'aimantation elle-même reste stable pendant cette durée. Il faut donc que

$$5 \quad \frac{KV}{kT} > \text{Log}(10\text{ans}/10^{-9}\text{s}) \text{ c'est-à-dire : } KV > 40kT.$$

Ceci impose une limite minimale au volume de la couche de stockage et donc à sa dimension latérale, c'est à dire une limite minimale à la dimension du point mémoire.

10 Par contre, si la couche magnétique de stockage est couplée à une couche antiferromagnétique dont l'anisotropie est relativement forte à température ambiante mais décroît rapidement lorsqu'on approche de la température de blocage de cette couche (vers 200°C),
15 alors la limite superparamagnétique est repoussée.

En effet, la barrière d'énergie à franchir pour retourner l'aimantation de la couche de stockage à température ambiante vaut maintenant $A(K_f E_f + K_a E_a)$ où A désigne l'aire commune à la couche magnétique de
20 stockage et à la couche antiferromagnétique, E_f et E_a désignent respectivement les épaisseurs de ces couches de stockage et antiferromagnétique et K_f et K_a désignent respectivement leurs anisotropies magnétiques.

Comme l'anisotropie K_a du matériau
25 antiferromagnétique est habituellement beaucoup plus forte que celle (K_f) de la couche ferromagnétique de stockage à température ambiante, il apparaît que la condition de stabilité $A(K_f E_f + K_a E_a) > 40kT$ pourra être
30 satisfaite pour des dimensions beaucoup plus petites que si la couche magnétique de stockage était seule.

Typiquement, le terme $K_a E_a$ peut être 100 fois plus grand à température ambiante que le terme $K_f E_f$. Ceci implique que l'aire de la jonction peut être 100 fois plus petite tout en restant au dessus de la limite
5 superparamagnétique. Ceci permet donc d'atteindre des densités d'intégration beaucoup plus fortes.

Précisons qu'il est également possible d'utiliser ce couplage de la couche de stockage à une couche antiferromagnétique à faible température de Néel
10 dans le cas précédemment décrit de couches magnétiques à aimantation perpendiculaire au plan. Là aussi, la limite superparamagnétique sera repoussée vers les plus petites dimensions à température ambiante.

2) Le deuxième avantage très important
15 résultant de l'utilisation d'une couche de stockage couplée à une couche antiferromagnétique est de pouvoir réaliser un stockage de l'information multinationaux.

En effet, avec les jonctions de l'art antérieur, un point mémoire a deux états possibles qui
20 correspondent aux deux configurations magnétiques parallèle et antiparallèle, ces dernières correspondant respectivement à des alignements parallèle et antiparallèle de l'aimantation de la couche de stockage par rapport à celle de la couche de référence.

25 Ces systèmes de type bistables sont obtenus en donnant à la couche de stockage une anisotropie magnétique d'origine magnétocristalline ou de forme (point mémoire par exemple de forme elliptique), avec un axe facile d'aimantation parallèle à l'aimantation
30 de la couche de référence.

Dans la présente invention, l'aimantation de la

couche de stockage peut être avantageusement orientée dans n'importe quelle direction intermédiaire entre la direction parallèle et la direction antiparallèle à l'aimantation de la couche de référence.

5 Pour ce faire, il suffit de chauffer la couche de stockage et la couche antiferromagnétique adjacente au dessus de la température de blocage de cette couche, en envoyant une impulsion de courant à travers la jonction, puis d'orienter l'aimantation de la couche de
10 stockage dans la direction désirée au cours du refroidissement de la couche antiferromagnétique.

 Pour donner l'orientation désirée à l'aimantation de la couche de stockage, il faut appliquer un champ magnétique local à cette dernière
15 dans la direction désirée. Pour ce faire, deux possibilités existent:

 1) On peut utiliser une architecture dans laquelle la commutation magnétique s'effectue en envoyant des impulsions de courant dans des lignes
20 conductrices perpendiculaires qui sont respectivement situées au dessus et en dessous de ce point mémoire.

 Ces lignes permettent de générer des champs magnétiques suivant deux directions perpendiculaires. En jouant sur l'intensité relative du courant circulant
25 dans les deux lignes, on peut générer un champ magnétique dans n'importe quelle direction du plan.

 Ceci est schématiquement illustré par la figure 11 qui montre un exemple de réalisation d'un point mémoire à partir d'une jonction tunnel à aimantation
30 planaire conformément à la présente invention.

 Pour l'écriture, la jonction tunnel magnétique

est chauffée au dessus de la température de blocage de la couche de stockage 112 mais en dessous de la température de blocage de la couche de référence 114, par l'envoi d'une impulsion de courant à travers la
5 jonction.

Les lignes conductrices supérieure 116 et inférieure 118 servent à créer des champs magnétiques 120 et 122 suivant deux directions perpendiculaires dans le plan, qui permettent de polariser l'aimantation
10 de la couche de stockage 112 dans n'importe quelle direction désirée dans le plan de la jonction, pendant son refroidissement.

Comme on l'a déjà expliqué précédemment à propos de la figure 10, la ligne 116 n'est pas indispensable :
15 elle peut être remplacée par la ligne 124.

L'aimantation de la couche de stockage peut donc prendre ici plus de deux états (stockage multiniveaux).

Sur la figure 11, la référence 123 désigne la
20 couche de barrière tunnel. On voit aussi la ligne conductrice 124 et le transistor de commutation 126 entre lesquels la jonction est comprise et qui permettent de faire circuler un courant à travers cette jonction lorsque le transistor fonctionne en mode
25 saturé.

2) On peut aussi utiliser la combinaison d'un champ magnétique créé comme précédemment, en faisant circuler un courant dans une ligne conductrice située au dessus ou en dessous de la jonction tunnel, avec le
30 couple magnétique exercé par l'injection d'un courant d'électrons à spin polarisé à travers la jonction

tunnel, dans la couche magnétique de stockage.

Dans ce cas, l'aimantation de la couche magnétique créant la polarisation du spin des électrons injectés devra être sensiblement perpendiculaire au
5 champ magnétique généré par le courant circulant dans la ligne conductrice.

Il est également important dans ce cas de faire en sorte que la densité de courant nécessaire pour orienter l'aimantation de la couche de stockage dans la
10 direction désirée soit sensiblement inférieure à celle qui est nécessaire à l'échauffement de la jonction de sorte que la jonction soit bien dans une phase de refroidissement en dessous de la température de blocage de la couche antiferromagnétique couplée à la couche de
15 stockage durant ce processus d'écriture.

La lecture se fait en mesurant le niveau de résistance de la jonction.

En effet, la résistance varie suivant la loi

$$R = R_{par} \left[1 + \left(\frac{\Delta R}{R_{par}} \right) \left(\frac{1 - \cos(\theta_s - \theta_p)}{2} \right) \right]$$

20 où θ_s et θ_p représentent respectivement les angles repérant respectivement les aimantations de la couche de stockage et de la couche piégée, ou couche de référence, dans le plan de la jonction.

$\Delta R/R_{par} = (R_{ant} - R_{par})/R_{par}$ est l'amplitude totale de
25 magnétorésistance.

La lecture du niveau de résistance intermédiaire entre la résistance parallèle R_{par} et la résistance antiparallèle R_{ant} permet donc de déterminer la direction de l'aimantation de la couche de stockage.

Dans les structures décrites précédemment, il est possible d'insérer de minces couches d'un autre matériau à l'interface entre la couche magnétique et la couche de barrière tunnel.

- 5 Ces minces couches peuvent être des couches magnétiques, destinées à renforcer la polarisation des électrons au voisinage de l'interface avec la couche de barrière tunnel, ou des couches non magnétiques permettant de réaliser des puits quantiques dépendant
- 10 du spin au voisinage de la couche barrière tunnel ou d'augmenter le découplage magnétique des deux couches magnétiques de part et d'autre de la jonction tunnel.

REVENDICATIONS

1. Dispositif magnétique (16) comprenant une
jonction tunnel magnétique (18; 52a, 52b, 52c, 52d; 74)
5 qui comporte :

- une première couche magnétique (20c, 36, 54, 82, 94, 114) formant une couche de référence et ayant une aimantation de direction fixe,

- une deuxième couche magnétique (20a, 38, 56, 10 86, 98, 112) formant une couche de stockage et ayant une aimantation de direction variable, et

- une troisième couche (20b, 48, 58, 84, 102, 123) qui est semiconductrice ou électriquement isolante et qui sépare la première couche de la deuxième couche,

15 ce dispositif étant caractérisé en ce que la température de blocage de l'aimantation de la couche de stockage est inférieure à la température de blocage de l'aimantation de la couche de référence et en ce que le dispositif comprend en outre :

- 20 - des moyens d'échauffement de la couche de stockage à une température supérieure à la température de blocage de l'aimantation de cette couche de stockage et

- des moyens (22, 26; 64, 66, 68; 108; 116, 25 118) d'application, à cette couche de stockage, d'un champ magnétique apte à orienter l'aimantation de cette couche de stockage par rapport à l'aimantation de la couche de référence, sans modifier l'orientation de cette couche de référence.

30 2. Dispositif selon la revendication 1, dans lequel les températures de blocage des couches de

stockage et de référence ont des valeurs supérieures à la valeur de la température de fonctionnement du dispositif hors échauffement de la jonction tunnel.

5 3. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 et 2, dans lequel l'aimantation de chacune des couches de stockage (38, 56, 86) et de référence (36, 54, 82) est sensiblement perpendiculaire au plan de ces couches.

10 4. Dispositif selon la revendication 3, dans lequel la couche de stockage (38) est une monocouche en alliage Co-Pt ou Co-Pd ou une multicouche formée par un empilement de couches (44) de Co alternant avec des couches (46) de Pt ou de Pd de façon que le champ coercitif de la couche de stockage diminue rapidement
15 quand la température augmente.

 5. Dispositif selon la revendication 3, dans lequel la couche de stockage est une monocouche en alliage riche en cobalt avec du fer ou du nickel ou du chrome ainsi que du platine ou du palladium, ou une
20 multicouche formée par un empilement de couches d'un alliage riche en cobalt avec du fer ou du nickel ou du chrome, alternant avec des couches de Pt ou de Pd de façon que le champ coercitif de la couche de stockage diminue rapidement quand la température augmente.

25 6. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 et 2, dans lequel l'aimantation de chacune des couches de stockage (20a, 98, 112) et de référence (20c, 94, 114) est sensiblement parallèle au plan de ces couches.

30 7. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, comprenant en outre une première

couche antiferromagnétique (50, 80, 96) associée à la couche de référence.

8. Dispositif selon la revendication 7, dans lequel la température de blocage de l'aimantation de
5 cette première couche antiferromagnétique (50, 80, 96) est supérieure à la température de blocage de la couche de stockage.

9. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, dans lequel la couche de
10 référence est une multicouche comprenant deux couches magnétiques et une couche intermédiaire en Ru ou en Re ou en Ir ou en Rh, les deux couches magnétiques étant séparées par la couche intermédiaire et couplées de façon antiparallèle par interaction à travers cette
15 couche intermédiaire.

10. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, comprenant en outre une deuxième couche antiferromagnétique (92, 100) couplée à la couche de stockage par anisotropie d'échange.

20 11. Dispositif selon la revendication 10, dans lequel la température de blocage de l'aimantation de cette deuxième couche antiferromagnétique (100) est inférieure à la température de blocage de la couche de référence.

25 12. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, dans lequel les moyens d'échauffement de la couche de stockage comprennent des moyens (22-24, 62-60a-60b-60c-60d, 76-78, 124-126) prévus pour faire circuler un courant d'électrons à
30 travers la jonction tunnel magnétique.

13. Dispositif selon l'une quelconque des

revendications 1 à 12, dans lequel les moyens d'application de champ magnétique à la couche de stockage (86) comprennent des moyens d'injection, dans cette couche de stockage, d'un courant d'électrons dont le spin est polarisé.

14. Mémoire comprenant une matrice de points mémoires adressables par des lignes et des colonnes d'adressage, cette mémoire étant caractérisée en ce que chaque point mémoire comprend :

10 - un dispositif magnétique (16) selon l'une quelconque des revendications 1 à 13, et

- un moyen (24) de commutation de courant placé en série avec ce dispositif magnétique,

chaque dispositif magnétique étant relié à une ligne d'adressage (22) et chaque moyen de commutation étant relié à une colonne d'adressage (28).

15. Procédé d'écriture d'une information dans un dispositif magnétique conforme à l'une quelconque des revendications 1 à 13, dans lequel

20 - on chauffe la couche de stockage (20a, 38, 56, 86, 98, 112) à une température supérieure à la température de blocage de l'aimantation de cette couche de stockage et

- pendant le refroidissement de la couche de stockage, on applique à cette couche de stockage un champ magnétique apte à orienter l'aimantation de cette couche de stockage par rapport à l'aimantation de la couche de référence (20c, 36, 54, 82, 94, 114), sans modifier l'orientation de cette couche de référence.

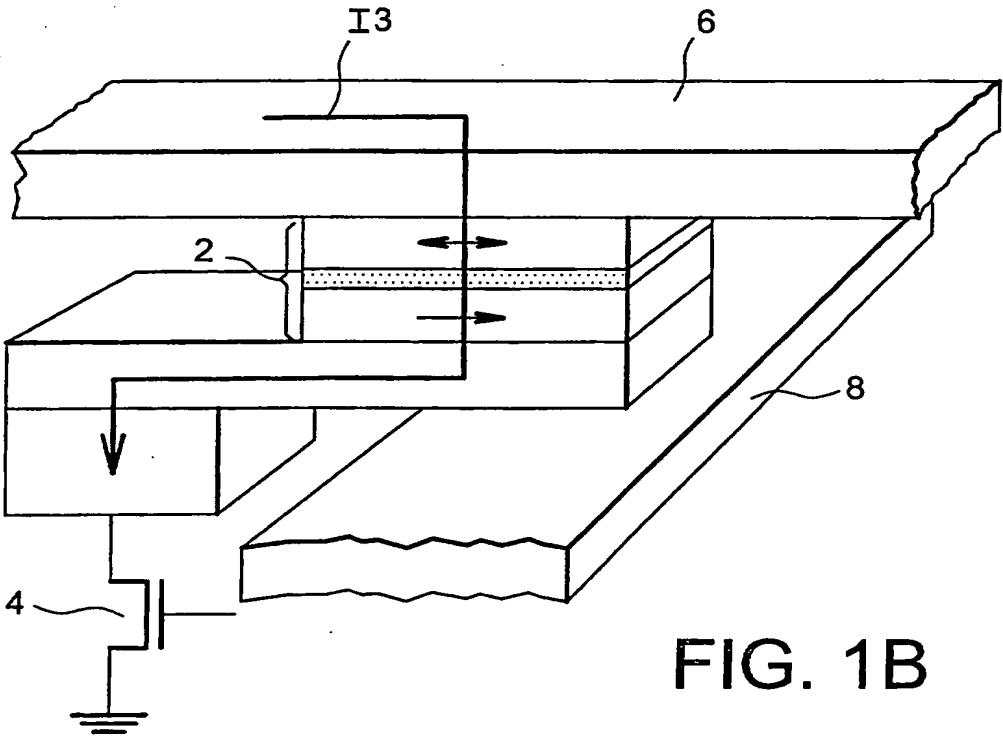
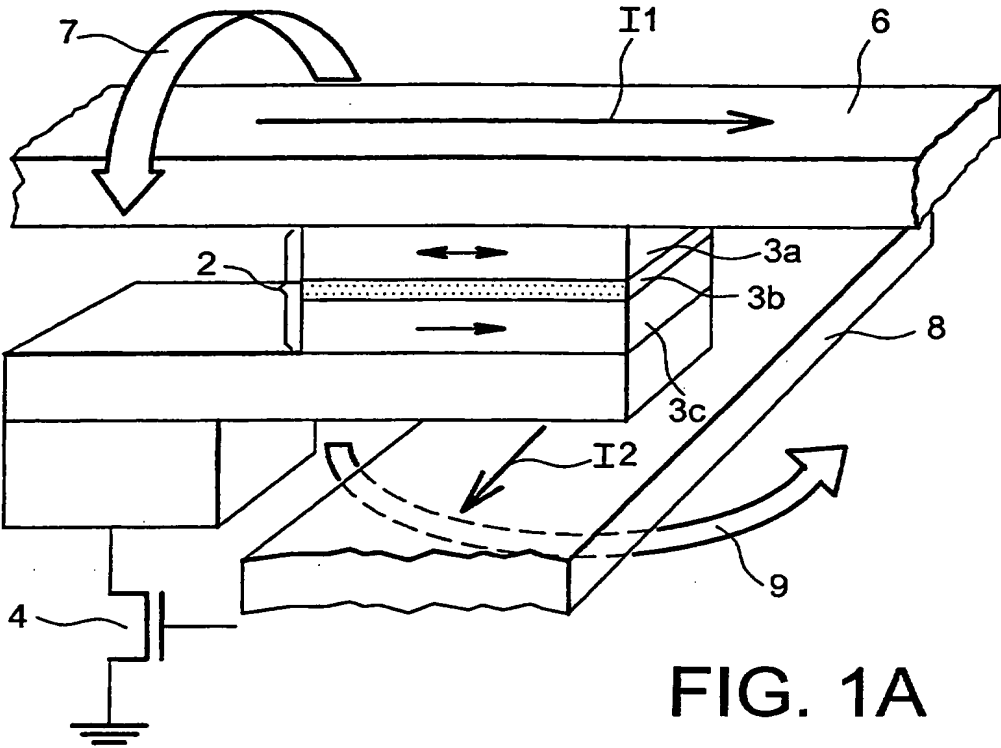
30 16. Procédé selon la revendication 15, dans lequel la valeur, vue par la couche de référence, du

champ magnétique (34, 72, 110, 120) appliqué au cours du stockage, est inférieure à la valeur que prend le champ magnétique de retournement de l'aimantation de la couche de référence à la température maximale atteinte
5 par cette couche au cours de l'échauffement de la jonction.

17. Procédé selon l'une quelconque des revendications 15 et 16, dans lequel la couche de stockage est couplée à une couche antiferromagnétique
10 (100) par anisotropie d'échange et l'on chauffe la couche de stockage et cette couche antiferromagnétique à une température supérieure aux températures de blocage de l'aimantation de ces couches et, au cours du refroidissement de la couche antiferromagnétique, on
15 oriente l'aimantation de la couche de stockage dans une direction quelconque prédéfinie par la direction d'aimantation du champ magnétique appliqué lors du refroidissement.

18. Procédé de lecture d'une information
20 mémorisée dans le dispositif magnétique selon l'une quelconque des revendications 1 à 13, dans lequel

- on détermine la valeur de la résistance de la jonction tunnel magnétique (18; 52a, 52b, 52c, 52d; 74), et
- 25 - on déduit l'orientation de l'aimantation de la couche de stockage à partir de cette valeur de la résistance.



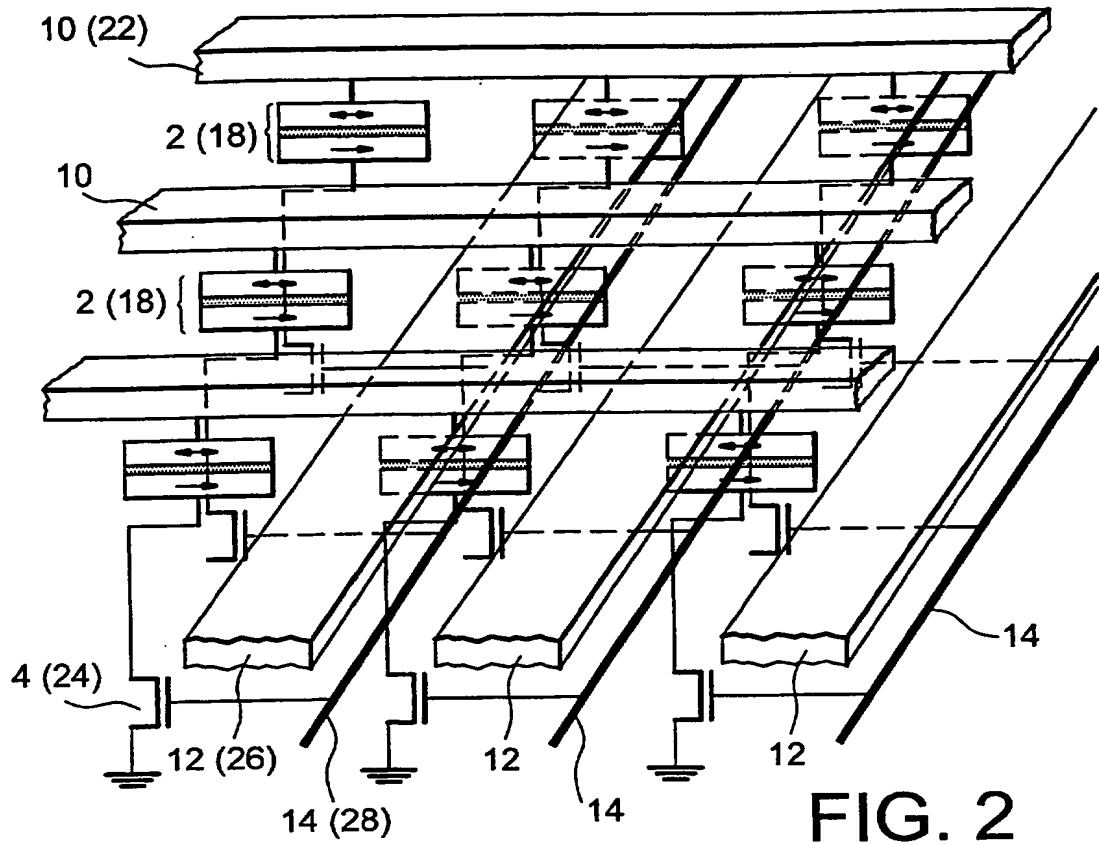


FIG. 2

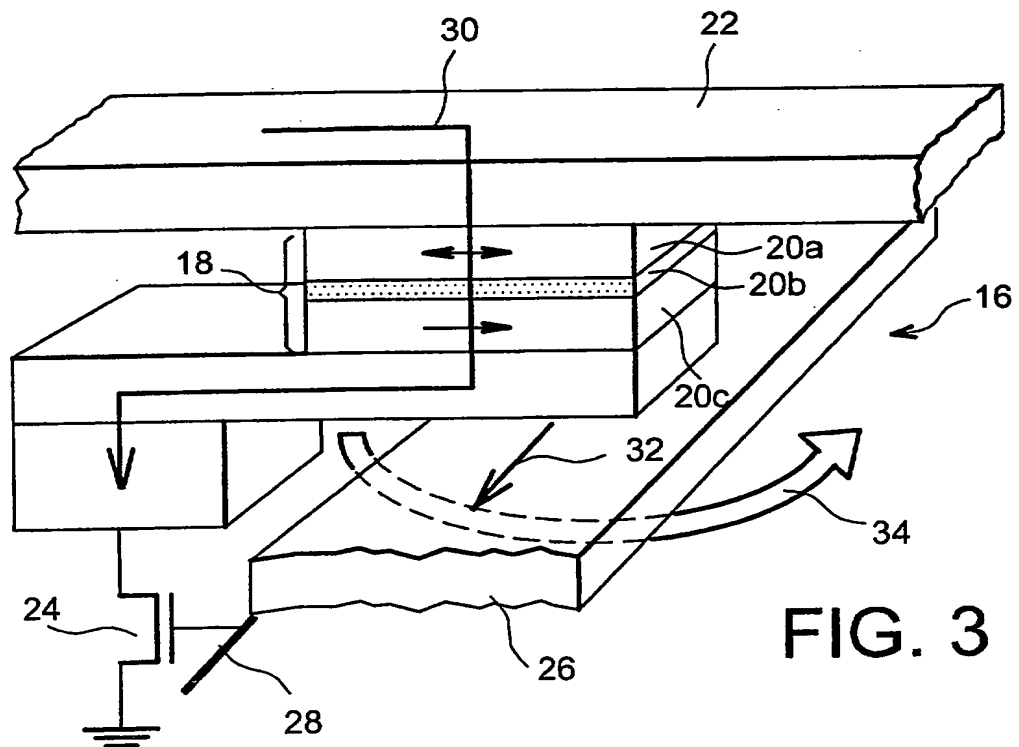


FIG. 3

FIG. 4

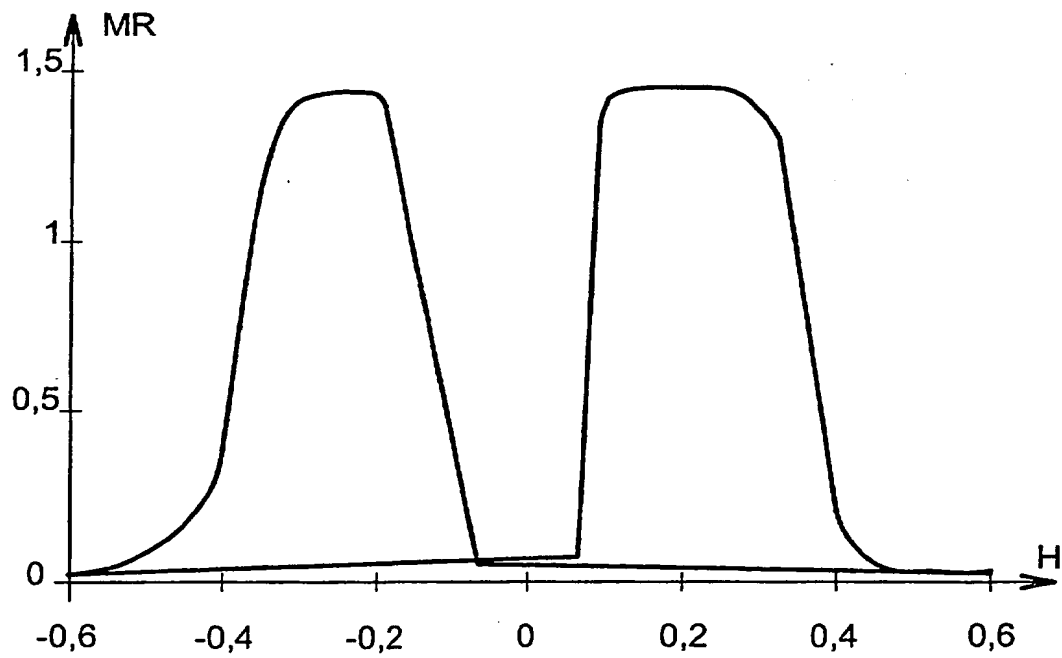
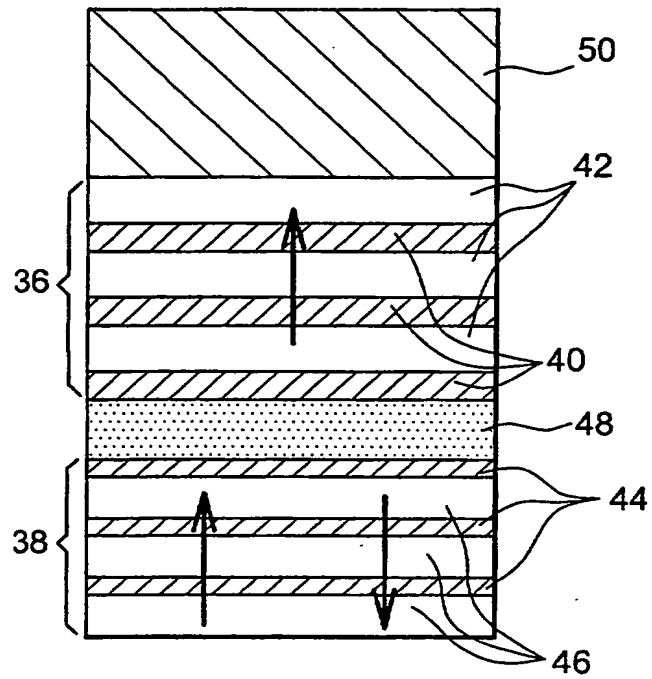


FIG. 5

4 / 7

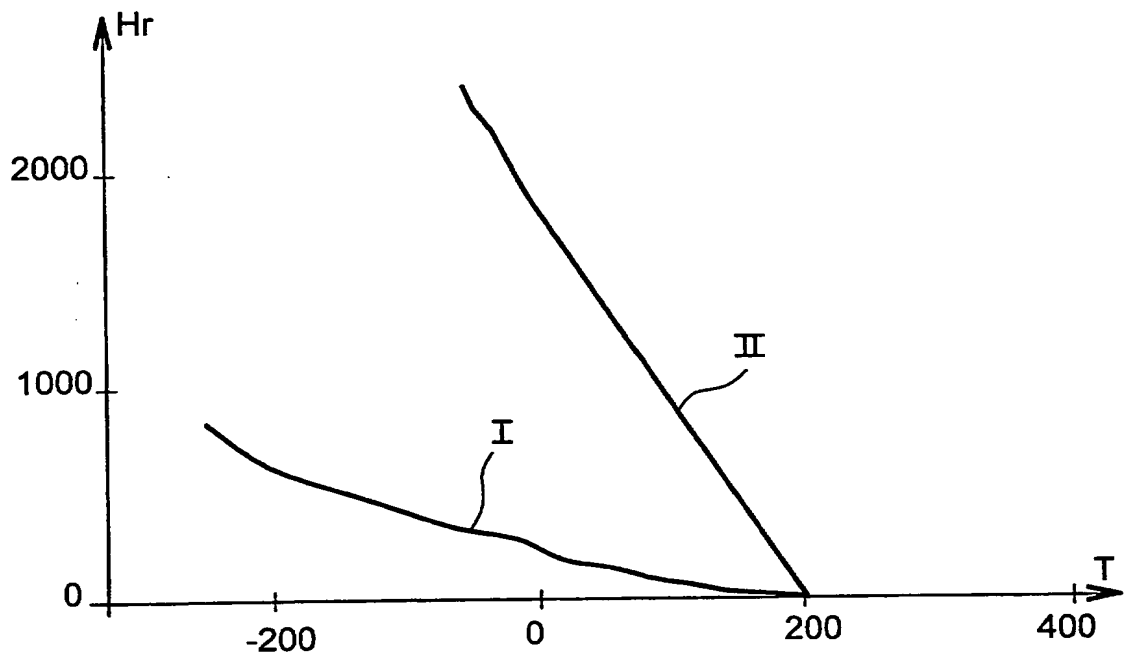
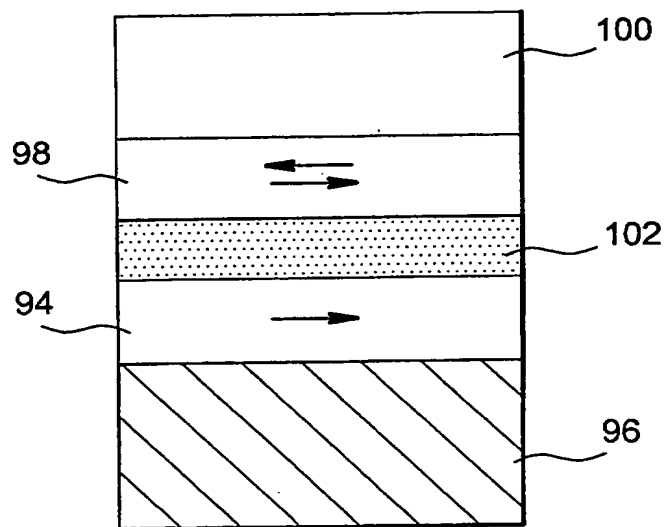


FIG. 6

FIG. 9



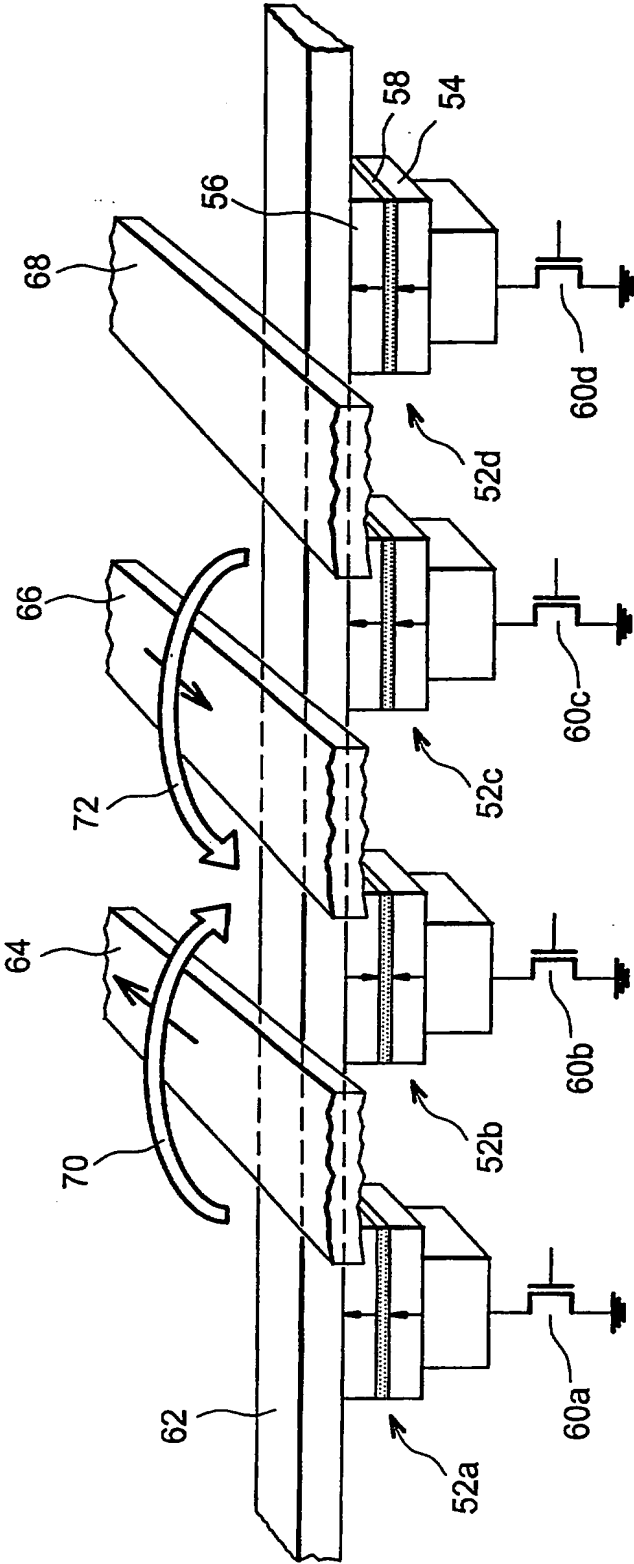


FIG. 7

6 / 7

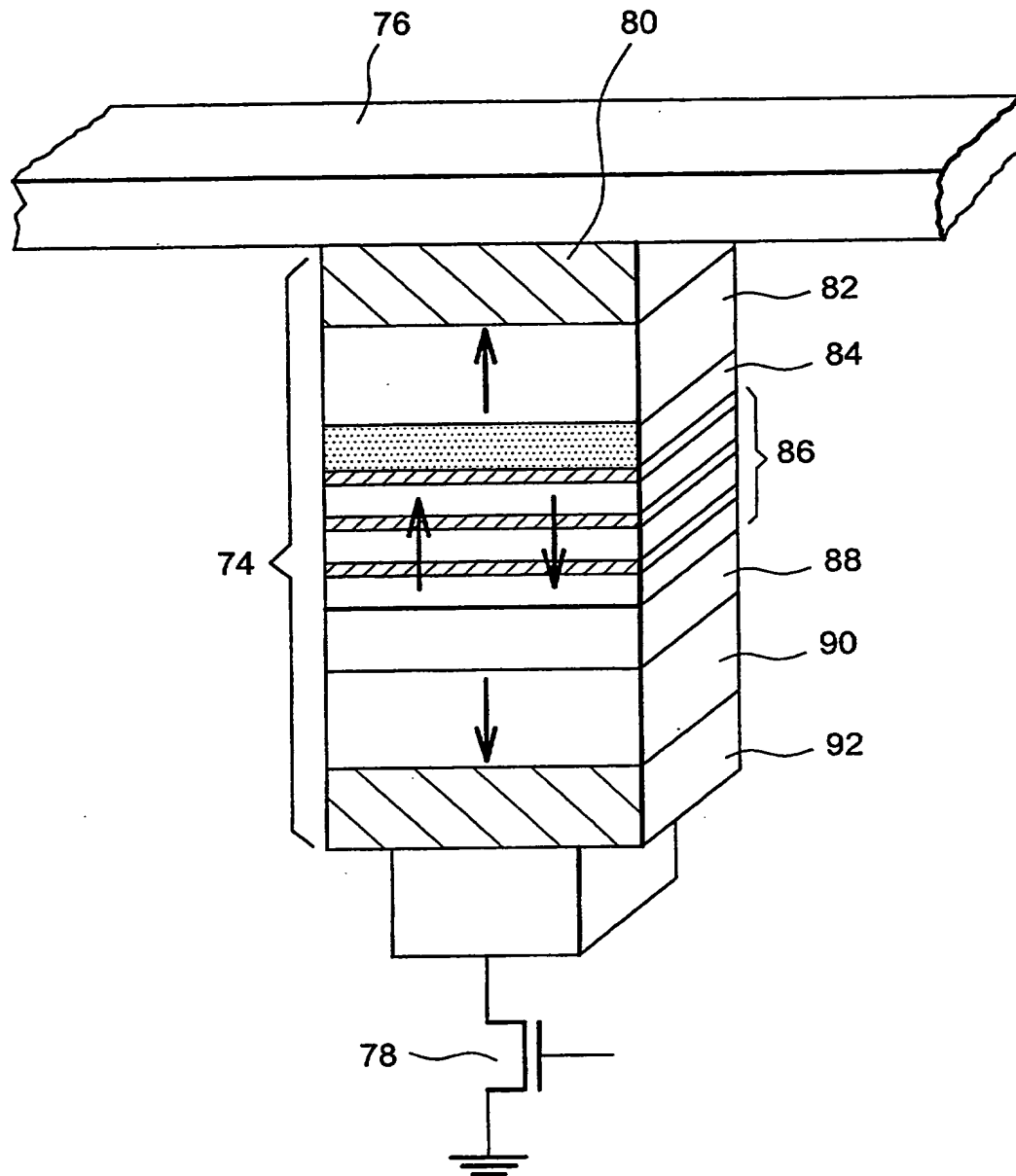
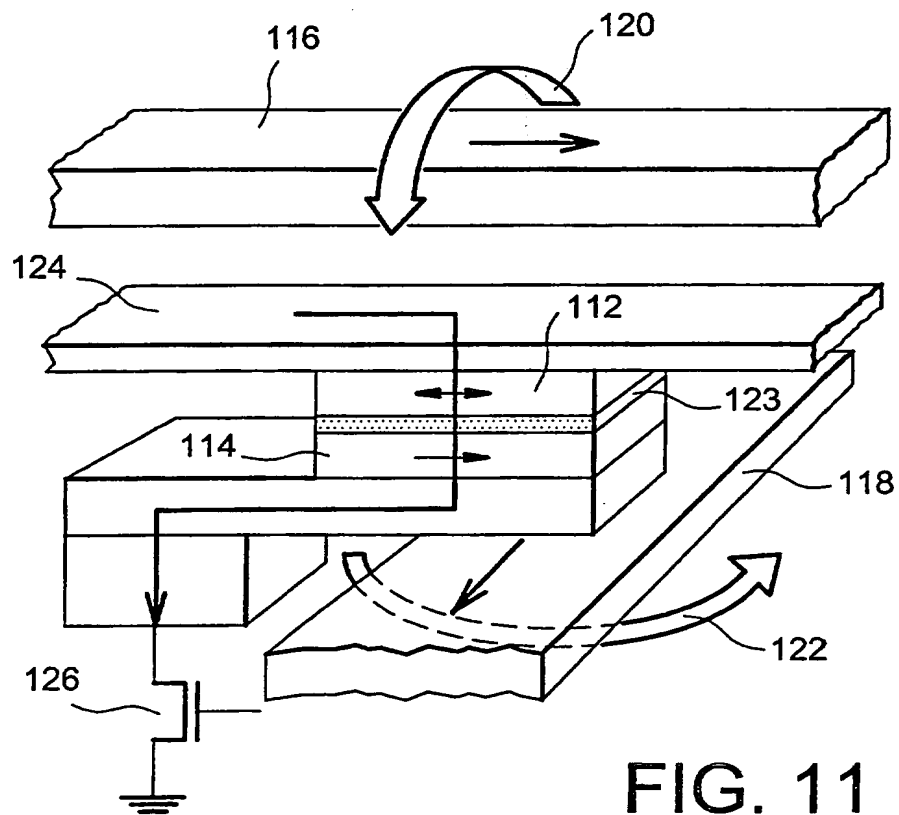
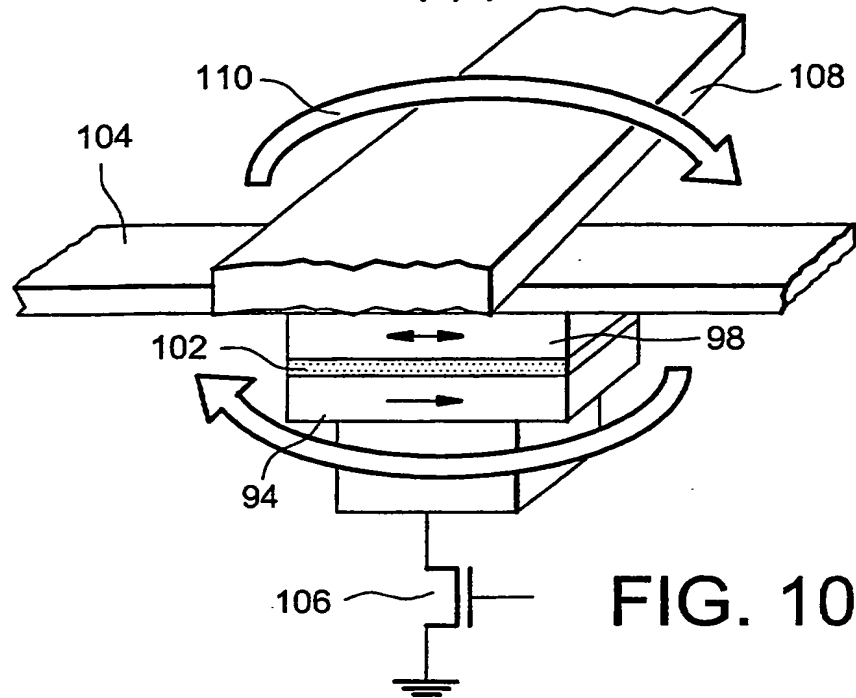


FIG. 8

7 / 7





2832542

N° d'enregistrement
national

RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

FA 612345
FR 0114840

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	WO 00 79540 A (NONVOLATILE ELECTRONICS INC ; POHM ARTHUR V (US); DAUGHTON JAMES M) 28 décembre 2000 (2000-12-28)	1,2,6,7, 15,16,18	G11C11/15
Y		12,13	
A	* le document en entier *	9,14,17	
E	US 6 385 082 B1 (TROUILLOUD PHILIP L ET AL) 7 mai 2002 (2002-05-07) * le document en entier *	1,2,12, 14-16	
Y	US 6 272 036 B1 (YOU CHUN-YEOL ET AL) 7 août 2001 (2001-08-07) * colonne 7, ligne 11 - colonne 8, ligne 64 *	12,13	
A	US 2001/019461 A1 (ALLENSPACH ET AL) 6 septembre 2001 (2001-09-06) * page 2, alinéa 24 - page 2, alinéa 27 *	3,4,15	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (Int.CL.7)
			G11C
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
2 août 2002		Degraeve, L	
<p>CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS</p> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire</p> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons</p> <p>& : membre de la même famille, document correspondant</p>			

1
EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 0114840 FA 612345**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date d'02-08-2002
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO 0079540 A	28-12-2000	AU 6121100 A EP 1196925 A1 WO 0079540 A1	09-01-2001 17-04-2002 28-12-2000
US 6385082 B1	07-05-2002	AUCUN	
US 6272036 B1	07-08-2001	AUCUN	
US 2001019461 A1	06-09-2001	EP 1130578 A2 JP 2001273601 A	05-09-2001 05-10-2001

EPO FORM P0465

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.